

キャビテーション壊食の被害を軽減あるいは修復するために、壊食面を金属めっき、肉盛り、溶射、樹脂などの非金属による被覆を行なうことがある。図1はこれまで各産業分野で開発されたコーティング法と膜厚について整理したものである<sup>1)</sup>。キャビテーション壊食では気泡崩壊時に発生する衝撃圧によって表面が著しく損傷し、壊食が激しくなると数mmに達するので比較的厚いコーティングが望まれる。このようなコーティングとしてCVD・PVD、塗装、めっき、溶射、肉盛りがあるが、CVD・PVDの壊食については本連載講座の「キャビテーション壊食 (14)<sup>2)</sup>」、高分子材料の壊食については「キャビテーション壊食 (16)<sup>3)</sup>」で述べたので、ここでは主にめっき材、肉盛り材、溶射材のキャビテーション壊食につ

て述べる。

### 1. めっき材

図2は、高Al青銅に各種の被覆を施した材料を磁歪振動法、回転翼車法、トンネル法で壊食試験した結果である<sup>4)</sup>。いずれの方式もCrめっき ( $H_V = 800 \sim 1100$ ) が最も優れた耐エロージョン性を示す。Niめっきや金属被覆では効果は小さく、流れを伴う試験方式では壊食抵抗が一層小さい。

めっき硬さについては、普通鉄に種々の条件でCrめっきを施した試験片では硬さに対応してエロージョン抵抗は増加している。しかし、図3に示すように<sup>5)</sup>、BS817M40鋼にCrめっきとNiめっきを施した試験片では、Crめっきは初期の壊食率を低下させる効果があるが、定常期では非めっき材と同じ壊食率を示す。一方、Niめっきでは、めっき後に熱処理によって硬化してやると ( $H_V = 600$ )、定常期の壊食率は1/3に低下する。壊食抵抗は被膜の硬さに依存するようであるが、残留応力やめっき厚さの影響も加わるので必ずしも統一した結果は得られていない。

めっき厚さについては、Glikmanの試験結果がある<sup>6)</sup>。図4に示すように、Crめっきした試験片では、0.01~0.02 mmのめっき厚さでは試験開始1時間後には破壊して効果がなくなるが、0.04 mm以上の膜厚では高い壊食抵抗を示す。露木ら<sup>7)</sup>もCrめっき材のキャビテーションピッチング数およびめっき被膜の破壊による自然電極電位の急激な変化を測定して、めっき厚さの大きい方が壊食抵抗の大きいことを報告している。しかしあまり厚くなると、界面での密着性が低下し、層内に大きい引張残留応力が発生

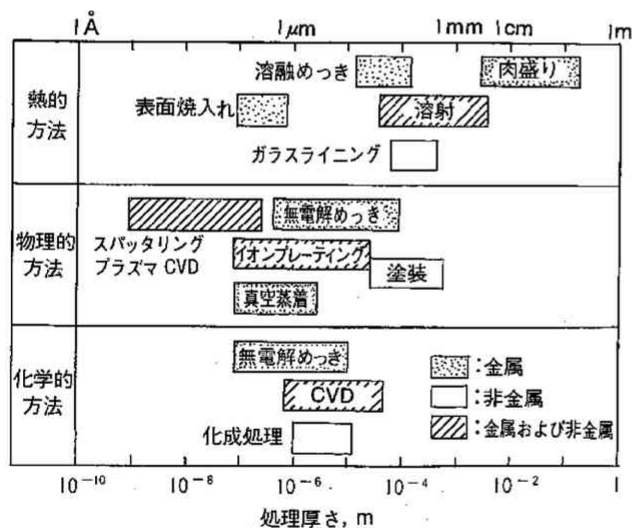


図1 表面改質技術と処理膜厚

\* 元 福井大学 工学部 機械工学科 (Tsunenori Okada)

\*\* 福井大学 工学部 機械工学科 (Shuji Hattori)

	磁歪振動装置 (mm <sup>3</sup> /120min)		回転ブレード装置 (mm <sup>3</sup> /dm <sup>3</sup> /day)			ウォータータンネル装置 (mm <sup>3</sup> / 30h)		
	0	1.0	0	20	40	0	2	4
ネオプレン								
ポリウレタン								
ニッケル めっき								
クロムめっき								
colmonoy溶射								
Al 青銅 肉盛り								
母材								

図2 三つのキャビテーション試験装置による6種類のコーティング材の試験結果

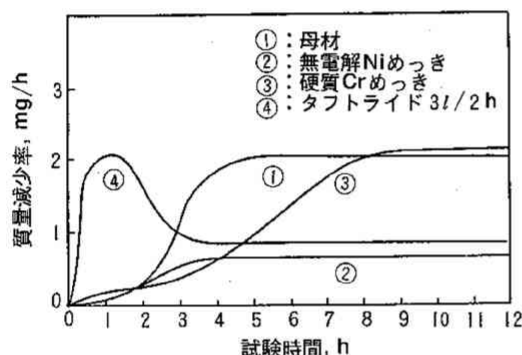


図3 表面処理の効果

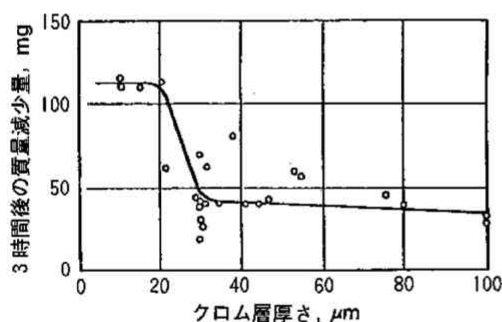


図4 クロムめっき層厚さの影響

し、微小割れの原因となるので適当なめっき厚が存在するはずである。

被覆材の耐壊食性は、被膜材と母材の密着性や硬さの相違、電池の形成など母材を含めて考える必要がある。図5と図6はSS41炭素鋼板にNiめっきとCrめっきを施した試験片を、対向二面

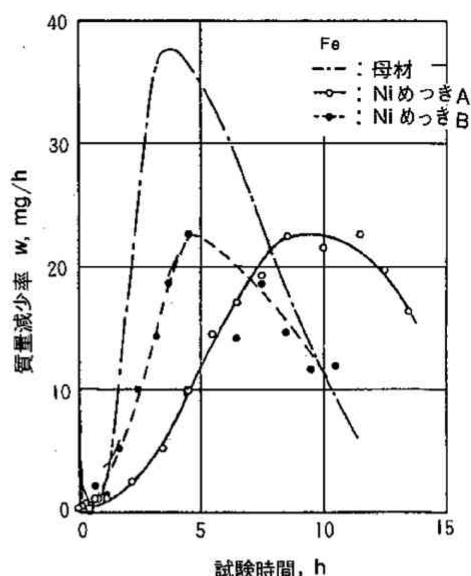


図5 Niめっき材の質量減少率曲線

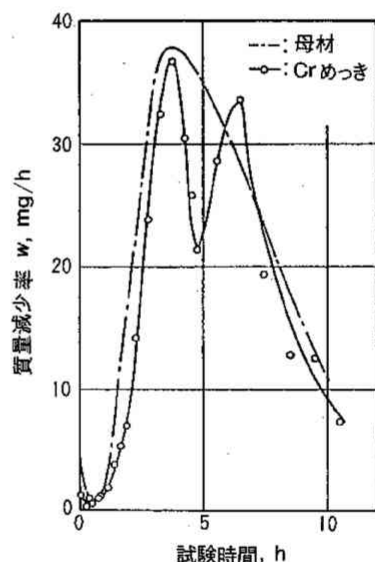


図6 Crめっき材の質量減少率曲線

方式の磁歪振動試験で行なった質量減少率曲線である<sup>8)</sup>。Niめっき材(厚さ5  $\mu\text{m}$ ,  $H_V = 590$ )では定常期の最大質量減少率は非めっき材の約60%である。図7に示すように、壊食面の断面形状は60分後でも壊食の大部分はめっき層内で小さな凹凸しか生じないが、一部めっき層を貫通して母材に達した鋭いピットが発生する。その後、母

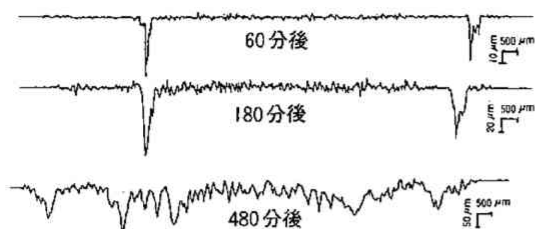


図7 Niめっき材の断面曲線

材の方が軟らかいので、どんどん深さの方向に成長して質量減少量に比べて深い壊食ピットを形成する。Crめっき材（厚さ  $25\ \mu\text{m}$ ,  $H_V = 612$ ）も同様の機構で壊食されるが、5時間後壊食率が極小値を示すのは界面付近で壊食率が減少するためである。それ以上に壊食が進行すると、めっき厚さが薄いために気泡崩壊の衝撃圧が母材にまで達してめっき効果はほとんど認められなくなる。結局、母材よりも硬いめっき材では壊食が母材にまで及ぶようになると凹凸の激しい壊食面になることに注意が必要である。

一方、母材よりも軟らかいZnめっきやすすめっきは効果がないとされている<sup>6)</sup>が、壊食域の母材と脱落后周囲に残存するめっき層が電気化学的に電池を形成して影響する。図8は、Znめっき（厚さ  $12\ \mu\text{m}$  と  $7\ \mu\text{m}$ ,  $H_V = 172$ ）を施した

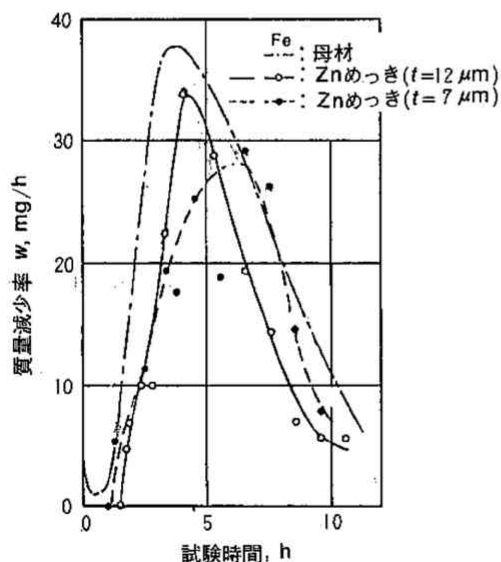


図8 Znめっき材の質量減少率曲線

SS41 炭素鋼板の質量減少率曲線である。めっき層下の母材の壊食は試験開始後80分頃から始まるが、壊食率は定常期以降でも非めっき材より小さい。めっき層を貫通して接合面に達したピットは、母材へは進展しないで、溶解や合体を繰り返してピット径が拡大し、壊食域のめっき層が完全に脱落したのちも壊食域は腐食溶解のために拡大する。そのために壊食域はカソード防食され、母材の壊食を軽減している。Snめっき材（ $H_V = 28$ ）では、めっき層は試験開始後わずか10分程度で脱落し、壊食面を被覆する効果は全くないが、定常期の母材の壊食率を約1/2程度減少させる。母材に対して電気化学的に貴のSnでも、Cuの下地めっきによって電気化学的な挙動に変化を生じたためである。結局、母材よりも軟らかいめっき層では一次的な防護効果はほとんど期待できないが、壊食面の周囲に残存するめっき層の二次的な効果が期待できるので場合によってはこのような手段も有効になる。

## 2. 肉盛り材

肉盛りは、キャビテーション壊食を受けた部材の補修や、安価な母材の上に耐食性、耐熱性、耐磨耗性に優れた被覆層を形成するために、主として溶接によって施工される。後述の溶射材とは異なり、母材と被覆層の間に溶込みが生じて密着性が優れていること、膜厚が2~20 mm程度まで大きくとれることなどの利点がある。

肉盛り材のキャビテーション壊食については、これまで二、三の報告があるが、系統的な研究は意外に少ない。Rheingans<sup>9)</sup>はステンレス鋼やアルミ青銅の肉盛りがキャビテーション壊食に特に優れていると報告している。さらに、表1に示すように、多くの肉盛り材でも耐壊食性に有効である。ただし、こうした肉盛り材料は損傷を受けると予測される全面にわたって被覆しなければ効果がない。また、「キャビテーション壊食(10)<sup>10)</sup>」で述べたように、Simoneauらは、オーステナイトステンレス鋼中のNiの代わりにCoを8~10%添加し、そのほかC, N, Sなどの微量添加元素の含有量を変化させた素材を作成してキャビテーション壊食試験を行なっている。これらの合金は肉

表1 種々の肉盛り合金

合金	ブリネル硬さ	質量減少量 (2時間後), mg
Lincoln Abrasoweld <sup>a)</sup>	320	2.5
Arcos Chromend <sup>b)</sup>	275	8.5
Smithway <sup>c)</sup>	137	23
Lincoln Standard O <sup>d)</sup>	-	27
Victor W 2310	145	27
Arcos Chromend K <sup>e)</sup>	136	29
Lincos Aerisweld AB-124 K	130	38
Monel 140-X	-	55

a) 12% Cr合金, b) 18% Cr-7% Ni, c) 18% Cr-8% Ni,  
d) 25% Cr-20% Ni, e) 19% Cr-9% Ni

盛り材料としても使用できるので参照されたい。さらに、「キャビテーション壊食(11)<sup>11)</sup>」で述べた Antony と Silence のステライト 6B や中野らの Cu-Al-Mn 系や Cu-Al-Ni 系合金も肉盛り材として使用できる。

表2は、著者らの研究室で系統的にキャビテーション壊食試験を行なった各種肉盛り材の化学成分と定常期の体積減少率を示したものである<sup>12)</sup>。肉盛り材は溶接性や硬さ、耐食性、耐熱性をバランスよく向上させるために多成分化されている。Fe-A は JIS 規格品ではないが、Cr を 35%, Ni を 20% 含有する耐食性に優れたステンレス鋼の肉盛り合金である。Co-A は、Cr を約 30% 含む Co 基合金で AWS (アメリカ合衆国溶接協会) 規格 ECoCr-A 相当材である。Ni-A は JIS H 8303 (自溶合金溶射) に規定されている MSFNi 1 とほぼ同程度の硬さに調節された合金であるが、じん性は JIS 規格材料よりもかなり改善されている。

Ni-B は、Ni-A よりも炭素を、Ni-C はほう素とけい素を少量添加させることにより硬さを高めた肉盛り材料である。Cu-A は Al との 2 元合金で、Cu-B は、高強度にするためにさらに Mn, Fe などを添加したものである。これらの肉盛り材料のうち、Fe 基、Co 基、Ni 基合金の肉盛りは SUS316 の板材の上に肉盛り材料の粉末をプラズマ溶接し、Cu 基は Ni-Al 青銅の板材の上に Mig 溶接した。

定常期の体積減少率の逆数を壊食抵抗と定義し、 $H_V^2/E$  ( $H_V$ : ビッカース硬さ,  $E$ : 縦弾性係数) との関係で整理すると図9のようになる。壊食抵抗は SUS304 の値を 1 として相対比較してある。図中には Simoneau によって得られた Co 基や Fe 基の試験結果も含めている。また、一般の圧延鋼材の結果を一点鎖線で示しているが、肉

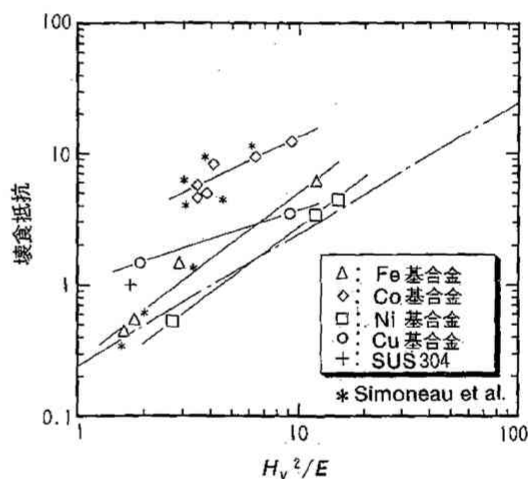
図9  $H_V^2/E$  と壊食抵抗との関係

表2 供試材料の化学成分 (wt %)

		Fe	Cr	Ni	B	Si	C	Mo	Co	W	Cu	Al	Mn	定常期の 体積減少率, mm <sup>3</sup> /h
Fe 基合金	Fe-A	Bal.	35.0	20.0	-	1.0	1.5	10.0	-	-	-	-	-	0.083
Co 基合金	Co-A	-	29.0	-	-	1.5	1.15	-	Bal.	4.5	-	-	-	0.042
Ni 基合金	Ni-A	5.0	15.0	Bal.	0.6	5.0	0.3	-	-	2.0	-	-	-	0.975
	Ni-B	2.64	10.6	Bal.	0.4	5.24	0.84	-	-	2.20	-	-	-	0.152
	Ni-C	5.24	18.1	Bal.	0.87	6.70	0.28	-	-	1.24	-	-	-	0.116
Cu 基合金	Cu-A	1.0	-	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	9.0	-	0.345
	Cu-B	3.0	-	2.0	-	-	-	-	1.0	-	Bal.	9.0	9.0	0.148

表3 処女面、壊食面のビッカース硬さ

		$H_V^{0.2}$ (処女面)	$H_V^{0.2}$ (壊食面)	増加率, %
Fe 基合金	Fe-A	591	636	7.7
Co 基合金	Co-A	511	661	29.4
Ni 基合金	Ni-A	349	362	3.8
	Ni-B	543	589	8.5
Cu 基合金	Cu-A	227	314	38.0
	Cu-B	329	388	17.9

盛り材料の耐壊食性は圧延鋼材と同等かもしくは優れていることがわかる。同一合金基では1本の直線関係で示され、材料の硬さと良い相関関係にあることがわかる。同じ硬さで比較すると、Co基、Cu基、Fe基、Ni基の順に耐壊食性に優れている。

キャビテーション気泡崩壊圧が材料表面に繰り返し作用すると、表面が加工硬化することが考えられる。表3は、処女面と試験終了後の壊食面（壊食面は凹凸が激しいので壊食域に近い非壊食域で測定）のビッカース硬さを測定したものである。図9で直線が上側に位置するCo基やCu基の材料は硬さの増加率は約18~38%で著しく加工硬化するが、Fe基やNi基では硬さの増加率は数%でほとんど加工硬化しない。同一の硬さでも合金基によって壊食抵抗が異なるのは材料の加工硬化性が大きく影響したためである。ただし、Co基は高い壊食抵抗を持つにもかかわらず加工硬化率はCu基とそれほど変わらない。「キャビテーション壊食(11)<sup>11)</sup>」で述べたように気泡崩壊圧が繰り返し作用すると面心立方晶からちゅう密六方晶に相変態し、衝撃エネルギーを吸収するため、最も優れた耐壊食性を示す材料である。

### 3. 溶射材

溶射は、棒・線・粉末などの形状の溶射用合金を、ガスや電気などの熱源を用いて溶融あるいは半溶融状態にして、高速で部材表面に衝突させて被膜を積層して形成する技術である。高温に加熱するのでアルミナやジルコニアなどのセラミック

スも溶射施工できる。

Akhtar<sup>13)</sup>は、各種の酸化物系のセラミックスを0.2% Cの構造用鋼の母材に約0.6 mmの厚さまで溶射した被覆材料をオープンビーカ方式の磁歪振動によるキャビテーション壊食試験を行なった。図10に示すように酸化物セラミックスはステンレス鋼よりも耐壊食性に劣っている。これはセラミックスを溶射した場合、溶射粒子間の結合力が弱く壊食されやすくなっているためである。

Mán と Krishnamoorthy<sup>14)</sup>は、Ni-Cr-Si合金と、この合金にWCを混入した複合材を母材のSUS304 ステンレス鋼に溶射した表面被覆材を回転円板法でキャビテーション壊食試験を行なった。図11は、○印がSUS304の母材の質量減少

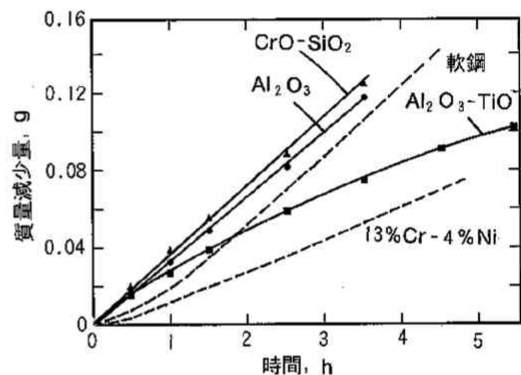


図10 各種セラミックス溶射材の質量減少量曲線

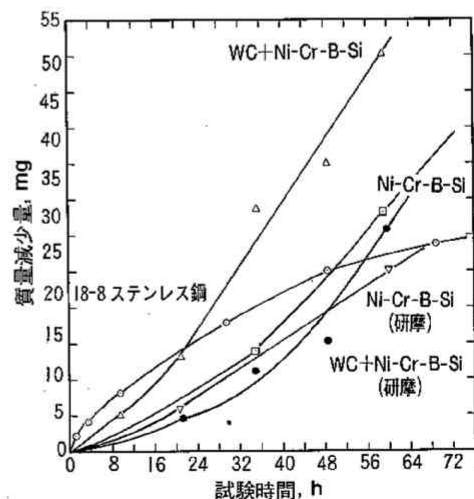


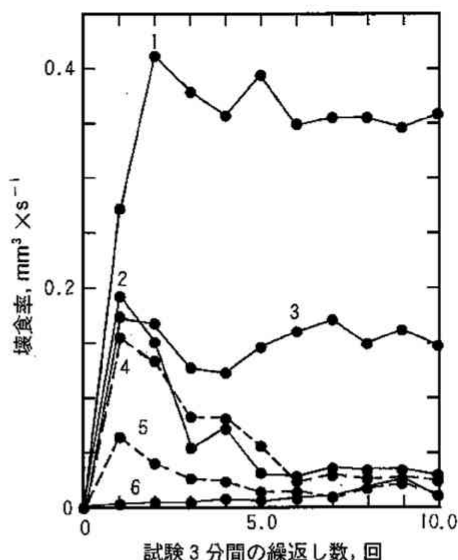
図11 各種溶射材の質量減少量曲線



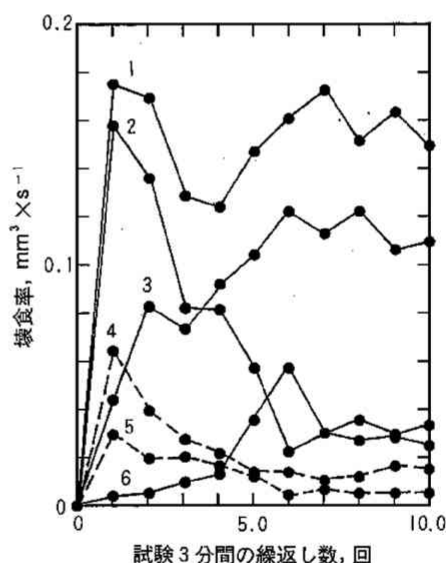
量曲線で、□印はNi-Cr-B-Si合金を、△印はこの合金にWCを混入して溶射後再溶融した(表面粗さ $R_a = 7 \sim 11 \mu\text{m}$ )もの、▽印と●印はこれらの表面被覆材料を $R_a = 0.5 \sim 0.75 \mu\text{m}$ まで表面研磨したものの結果である。10時間後の質量減少量で比較すると、溶射材は母材に比べて極めて耐壊食性に優れている。ただし、△印のようにWCを混入すると、WCが丸ごと脱落して耐壊食性は逆に低下する。こうした挙動は●の研摩材では、52時間以後の定常期に現われている。溶射後研磨することにより潜伏期の延長が認められる。

Adamski と Mcpherson<sup>15)</sup> は Meteco 社製の2種類のニッケル基合金、3種類のアルミ青銅の溶射材を磁歪振動装置の対向二面方式でキャビテーション壊食試験を行なった。図12(a)は溶射したままの材料、図(b)は溶射後再溶融加熱した材料の体積減少量曲線である。図(a)でピーク値を比較すると、10% Alのアルミ青銅が最も耐壊食性が悪く、Cr-Si, Ni合金, 9.5% Al-1% Feアルミ青銅, 9% Al-1% アルミ青銅, Cr-Fe, Ni合金の各溶射材、アルミ青銅鍛造材の順になっていて、溶射のままでは気孔が無数に存在して耐壊食性が極めて悪い。気孔を除去するために溶射後加熱すると、図(b)のように、耐壊食性は2倍程度向上する。

肉盛りと溶射の施工方法の違いによる耐壊食性の差異を明らかにするために、著者らの研究室では同一の合金を肉盛りおよび溶射して壊食試験を行なった<sup>16)</sup>。図13(a)は、肉盛り材料の体積減少量曲線でどの材料も壊食量のわずかな潜伏期間を経た後、急速に体積減少量が増加(増加期)、一定の勾配を示す定常期に至る。図(b)は、溶射材料の体積減少量曲線である。Ni基合金の溶射材料は肉盛り材料と同様に潜伏期間、増加期、定常期がみられる。Ni-Aは肉盛り材料に比べて10時間後に約半分の減少量となって耐壊食性が良くなるが、Ni-B, Ni-Cは10時間後に肉盛り材料の1.1倍程度の減少量を示し、ほとんど肉盛り材料と変わらない。しかし、Cu-A, Co-Aは溶射することによって、耐壊食性は著しく低下する。詳細に調べると、Cu-AとCo-Aは試験開始直後



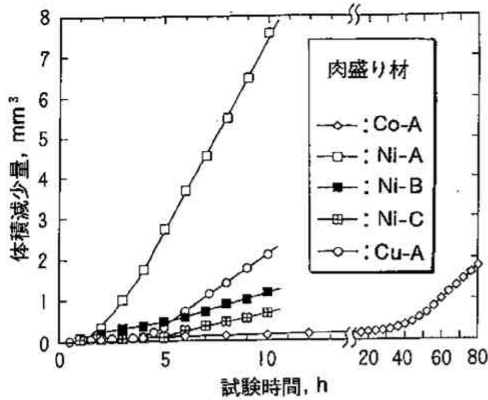
(a) 金属コーティング溶射のまま:  
1-445, 2-451, 3-51FNS, 4-sprabronze,  
5-15E, 6-Al-bronze (鍛造)



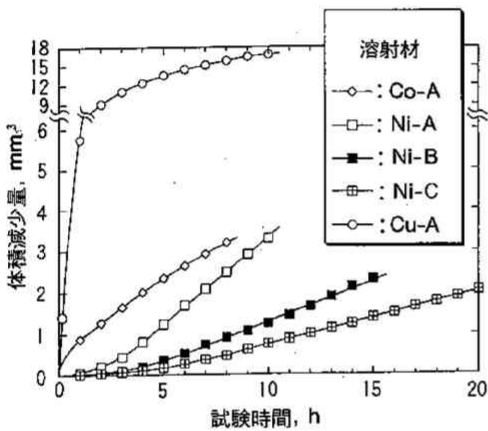
(b) 金属コーティング溶射+再溶融加熱:  
1-51FNS-as-sprayed, 2-sprabronze-as-sprayed, 3-51FNS-sintered, 4-15E-as-sprayed, 5-15E-fused, 6-sprabronze-sintered

図12 各種溶射材の壊食率曲線

10分から1時間の体積減少量が急激に増加している。結合力の弱い溶射粒子がキャビテーション気泡崩壊圧によって一挙に脱落したためと考えら

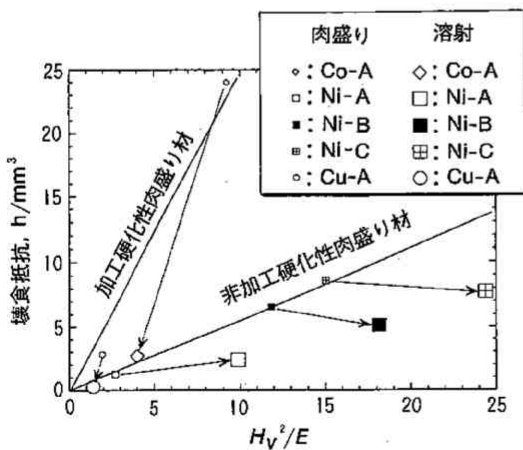


(a) 体積減少曲線（肉盛り材料）



(b) 体積減少曲線（溶射材料）

図 13 肉盛りと溶射の施工の比較


 図 14  $H_V^2/E$  と壊食抵抗との関係

れる。その後減少曲線はほぼ直線的に増加するが、4 時間以降になると徐々に減衰する過程がみられる。定常期の直線の傾きから体積減少率を求め、その逆数の壊食抵抗を求めて  $H_V^2/E$  の関係を求めると図 14 のようになる。図中の直線は、前節で述べた肉盛り材料のうち加工硬化性肉盛り材料 (Co, Cu 基)、非加工硬化性肉盛り材料 (Ni 基) の結果を通るように引いたものである。図中の矢印は、肉盛りから溶射への変化を表わしている。Co-A, Cu-A は硬さの低下が小さい割には、壊食抵抗の低下が著しい。溶射材料には多数の気孔が存在し、耐壊食性に影響したためと考えられる。Ni-A, Ni-B, Ni-C は、溶射による急速冷却のために組織が微細化して硬さが増加するので、壊食抵抗の低下はわずかである。

溶射材料の気孔率と、肉盛り材料の壊食抵抗に対する溶射材料の低下率の関係を図 15 に示す。気孔率の計測は、気孔が試験片作製時の研磨で塞がれやすいことや結合力の弱い溶射粒子が試験初期に容易に脱落することを考慮して、キャビテーションに 10 分間さらした壊食面で測定している。壊食抵抗の低下率は溶射材料と同じ硬さの肉盛り材料の壊食抵抗を求め、この値に対する溶射材料の低下率として求めた。溶射材料では、気孔率が高くなるほど耐壊食性が悪くなる。

最後に、表面被覆材や表面改質材は日進月歩に開発されている。例えば、Hu らの報告にもみられる<sup>17)</sup> ように、イオン注入によって S15C 炭素

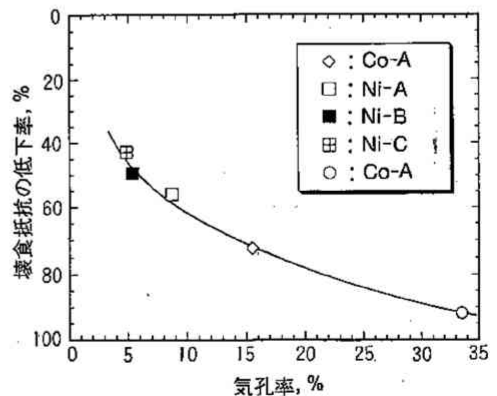


図 15 気孔率と壊食抵抗の低下率との関係

鋼の潜伏期が約3.3倍長くなったという報告もある。表面改質材による耐キャビテーション壊食性の向上についてはまだまだ未開拓の分野である。

#### 参考文献

- 1) 納富ほか：三菱重工技報，27，362 (1990)。
- 2) 岡田庸敬・服部修次：機械の研究，50，10 (1998) p.1078。
- 3) 岡田庸敬・服部修次：機械の研究，50，11 (1998) p.1182。
- 4) 中城忠彦・久保 宏・浜田忠嗣・木下秀次郎：材料，14，136 (1965) p.54。
- 5) C.J. Heathcock and A. Ball, et al. : Wear of Material, 1981 ASME Proc. (1981) p.597。
- 6) L.A. Glikman: "Corrosion - Mechanical Strength of Metals", London Butterworths, (1962)。
- 7) 露木昭治・江成孝文：防食技術，30，1 (1981) p.54。
- 8) 岡田庸敬・岩井善郎・栗津 薫：日本機械学会論文集(A編)，53，485 (1987) p.39。
- 9) W.J. Rheingans : Materials in Design Engineering (1958-9) p.102。
- 10) 岡田庸敬・服部修次：機械の研究，50，6 (1998) p.699。
- 11) 岡田庸敬・服部修次：機械の研究，50，7 (1998) p.787。
- 12) 服部修次・岡田庸敬・堀 友和・森 啓之，ターボ機械，24，12 (1996) p.713。
- 13) A. Akhtar : Materials Performance (1982) p.15。
- 14) B.S. Mann and P.R. Krishnamoorthy : Wear, 103 (1985) p.43。
- 15) A. Adamski and R. McPherson : Adv. Therm. Spraying (1986) p.523。
- 16) 堀 友和・服部修次：日本機械学会講演論文集，No.987-1 (1998) p.3。
- 17) W.W. Hu, C.R. Clayton and Herman : Materials Science and Engineering, 45 (1980) p.263。

#### 海外ニュース

#### 30%から50%も安価な精密減速機

ジラル・トランスミッション社の新型ウォーム減速機は、高精度、最小バックラッシュ、高荷重サイクルなどが要求される梱包機械、ハンドリングマシン、ロボット、プレスフィーダ、工作機械など、あらゆる種類のサーボアプリケーションを対象としている。他の精密減速機に比べ、価格が30%から50%も安価である。

製品は、最大2300 N・mの出力加速トルク、最大6000 rpmの入力速度、1/5から1/90の減速比をカバーしている。効率は、減速比によっては95%にも達し、可逆性は1/5から1/30の減速比について保証されている。

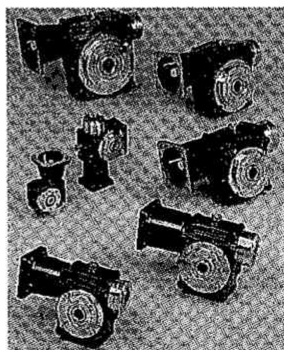
同社の減速機は、工場でアウトプットシャフトのアークを1分間に調整されて引き渡される。ウォーム軸とウォーム歯車の形状の接合が完璧に近いので、トランスミッションエラーを0.01°以下の値に制限することができる。また、ヘルツ圧力も大きく減圧される。ウォーム歯車については、特殊な化学組成の材料と最良の合成潤滑剤を使用しているため、バックラッシュを大きくしなくても数千時間機能する。

会社名：GIRARD TRANSMISSIONS (ジラル・トランスミッション)

所在地：BP 208 - Induspal Lons - 64142 BILLERE  
CEDEX - FRANCE

TEL : (33-5) 59 40 03 01

FAX : (33-5) 59 32 11 45



(フランス大使館産業技術広報センター提供)  
(TEL 03-3435-7455, FAX 03-3435-7457)